栽培環境調控與植物健康管理

蔡致榮[1]

摘　要

栽培環境調控牽涉範圍廣泛，一般以溫室內生產較容易實際運作，大體而言，溫室環境控制包括溫室結構、相關設備與特徵化溫室作物生產之每日管理決定。而植物健康管理所揭示「經由揣摩植物本身與週遭之生物、物理與化學條件等相關性，藉人為技術之修飾」之意涵，實是溫室環境最佳化管理長期以來追求與努力之目標。本文除整理改寫佛羅里達溫室蔬菜生產手冊中有關溫室環境考量、溫室環境控制與植物生理之基本內涵與觀念，提供讀者全盤理解，俾利未來植物健康管理實踐參考外，亦說明「整合無線區域網路與即時視訊之溫室數位環控肥灌系統」之國內環境控制實例。最後並強調「管理光合作用與呼吸作用並藉助環控技術進行作物控制」之理念與努力方向，冀望將植物健康管理概念融入現代化環境控制系統，以進一步形塑根基於生物資訊之最佳化先進控制技術。

關鍵詞：環境控制、植物健康管理、作物控制

前　言

栽培環境調控牽涉範圍廣泛，一般以溫室內生產較容易實際運作，大體而言，溫室環境控制包括溫室結構、相關設備與特徵化溫室作物生產之每日管理決定，其牽涉新興建技術與致動器之發展、植物生理過程與溫室環境之模式化，以及溫室環境最佳化管理等相關技術之精進。典型溫室控制乃手動調整、定時事件與定溫調整作動等之混合，複雜操作則使用電腦，而電腦化環境控制讓整合溫室不同組件成有效率且獲利之系統成為可能。

林等(2005)闡述並指出植物健康管理乃是整合各種農業技術成為知識，以知識及遵循自然生態原則來營造環保的植生環境並創造產業利潤，經由揣摩植物本身與週遭之生物、物理與化學條件等相關性，藉人為技術之修飾，佐以企業化經營，從健康種苗量產一直到作物栽培及植生環境之管理，以預防醫學及保健原則，配合標準作業流程(SOP)，期能不施用或減少造成環境問題之化學製劑，穩定量產安全、高機能營養、富風味、可安心食用且具經濟效益之生機農產品，並營造健康安全的生存環境及改善生活品質。睽其意旨，「經由揣摩植物本身與週

[1] 行政院農委會農業試驗所農業工程組

遭之生物、物理與化學條件等相關性，藉人為技術之修飾」部分實是溫室環境最佳化管理長期以來追求與努力之目標，畢竟獲利性溫室生產取決於牽涉植物生長化學過程之複雜系統，靠著最佳化溫室與栽培管理系統，種植者才能最大化植物生長效率，並因而有高品質產品之高產出。

本文除整理改寫佛羅里達溫室蔬菜生產手冊中有關溫室環境考量、溫室環境控制與植物生理之基本內涵與觀念，提供讀者全盤理解，俾利未來植物健康管理實踐參考外，亦說明「整合無線區域網路與即時視訊之溫室數位環控肥灌系統」之國內環境控制實例。

溫室環境設計考量(Jones, 2008a)

溫室之初始目的在於簡單地維持原本無法於外界冬天氣候狀況下倖存之作物使能夠存活，早期北方緯度之種植者認知有時果蔬的生產或在作物無法正常成長的地方溫暖的溫度條件是必須的，因此，早期溫室被設計成可提供作物陽光與溫暖兩項基本成分，後來，種植者開始理解降溫對特定作物於溫暖時期生產之重要性，排氣因此被增加以允許溫室內溫暖空氣與外界冷空氣進行交換。

目前園藝學家確認每一作物品種(甚至相同種間)有其特殊之溫度反應特性，就種植者而言，其意味著在整個冷熱氣候期間僅維持作物存活並不足夠，成功之種植者必須一貫地提供作物可發展與正常生產之溫度，因此，加熱與冷卻系統必須被設計成不只避免溫度達到極度損害程度，而且可於種植作物正常生長與發展溫度特性範圍內平穩地運作。

一、熱能交換

任何時間溫室溫度取決於溫室系統與外界環境之熱平衡或能量淨流，有三種基本熱能交換過程，即傳導、對流與輻射。熱傳導係經由固體材料或直接物理接觸材料之能量轉換，其傳導速率取決於材料之物理特性(密度與傳導率)、材料厚度與通過材料間溫度差異。藉由傳導之熱傳遞可以使用不良導熱材料予以最小化，例如快速泡沫塑料(styrofoam)係熱的不良導體，銅則有非常高的熱傳導率，而雙層嵌板系統(double-layered glazing systems)則利用熱傳導率低的空氣形成空氣絕緣層以減低熱損失。

對流熱傳遞係氣體或液體在不同溫度區域間之物理移動所造成之現象，例如，冬天在溫室內當溫暖空氣上升，並傳遞其熱量至溫室嵌板(藉傳導傳遞能量至外界空氣)之冷表面時，即發生對流熱傳導，而當溫室空氣在溫室頂端與嵌板表面接觸而冷卻後，其將流回至地板。滲透(infiltration)情形係對流熱交換之另一型式，其交換溫室內外空氣，滲透率取決於裂口與其他溫室外殼開口之大小與數

目，也與外界風速有關。滲透之能量交換率係空氣進入溫室與離開溫室間溫度差異之簡單函數，而風由於減低在嵌板表面滯留空氣薄膜層之厚度直接提高從溫室外表面之對流熱傳率。

輻射熱傳遞在並無任何實體接觸或傳輸介質之物體間發生，所有物體向各方向輻射能量，然而他們改變其吸收與散發輻射之能力，從太陽傳遞至地球之所有能量係輻射能量傳輸的結果，當然人類由於眼睛可看到光而直接知道陽光，但也有從太陽而來之輻射能源是看不到的，當輻射能源遇上某一物體，由於輻射波長與特定物體之光譜特性差異，它會被傳送(transmitted)、反射(reflected)或吸收(absorbed)。例如，清澈溫室嵌板材料傳送大部分人們可見之光、反射大約10%，而吸收非常少量之光。然而嵌板材料可能在其他波長波段(例如紅外線)有非常不同之特性，當輻射被吸收，它將被轉成熱能而暖和吸收它的材料，通常高反射材料可減低輻射交換，然而灰暗材料則是有效之吸收者與再輻射者。

二、熱量損失計算

為正確決定溫室加熱系統之尺寸，估算可預期最冷冬天狀況之熱損失是必須的。計算溫室熱損失，有兩主要因子：經由溫室嵌板之損失與由於滲透之損失。

方程式(1)可用以估算經由溫室嵌板材料從溫室內之高溫至外界較冷溫度之熱量損失：

$$Qc = U\,A\,(Ti - To) \qquad (1)$$

此處，Qc = 總“傳導”熱損失(Btu/hr)，U = 總熱傳遞係數(Btu/(ft^2 °F hr)，A = 總外曝屋頂與牆壁面積(ft^2)，Ti = 溫室內溫度(°F)與To = 外界空氣溫度(°F)。

儘管能量經由嵌板材料係以傳導方式傳遞，從溫室外表面至外面環境之真正熱傳遞牽涉傳導、對流與輻射交換過程之複雜混合，方程式(1)使用由整合能量交換過程且針對不同嵌板系統所發展出來之代表性總熱傳遞係數(U)以減化此估算步驟，表1給予某些常用嵌板結構組合之此類數值。

方程式(2)可用以估算由於滲透空氣交換之熱量損失：

$$Qi = .02\,V\,C\,(Ti - To) \qquad (2)$$

此處，Qi = 總傳導熱損失(Btu/hr)，V = 溫室體積(ft^3)，A =總外曝屋頂與牆壁面積(ft^2)，Ti = 溫室內溫度(°F)與To = 外界空氣溫度(°F)。

方程式(2)中.02係轉換因子(Btu/(ft^3 °F))，其計算單位體積空氣之能量保持能力。此方程式之關鍵是C值，其係由於溫室洩漏每小時之空氣交換值。表2給予數種常用溫室覆蓋之某些估計值。

方程式(1)與方程式(2)都牽涉取決於溫室物理大小之項目，因為傳導熱損失係經由牆壁與屋頂，也因此總熱損失隨著表面積之增加而增加。相同地，與特定型態結構有關之正常洩漏直接與表面積(與體積)相關。

表一、總熱傳遞係數(Jones, 2008a)
Table 1. Overall heat transfer coefficients

嵌板材質 Glazing materials	總熱傳遞係數 Overall heat transfer coefficient U, Btu /(ft^2 °F hr)
玻璃：	
單層	1.1
雙層, 間距1/2″	0.7
聚乙烯膠膜：:	
單層	1.1
雙層, 分離的	0.7
光纖玻璃嵌板	1.0
雙層壓克力(丙烯酸酯)板	0.6

兩種情形中，最小化溫室表面積相對於可種作物之地板面積明顯較佳，這也是連棟式溫室比獨立溫室能源使用上較有效之原因。兩個方程式中計算之熱損失也直接取決於溫室與外界空氣溫度間之差異，為使用此兩方程式以估算可能之能源需要，必須選擇數值給Ti與To，溫室內部溫度(Ti)係作物可安全忍受之最低溫度，而外界溫度值To必須是溫室所在區域可預期之最低冬天溫度。

表二、溫室洩漏空氣交換(Jones, 2008a)
Table 2. Greenhouse leakage air exchange

結構類型 Type of construction	每小時空氣交換 Air exchanges per hour
新結構：	
玻璃或纖維玻璃	0.75 - 1.5
聚乙烯：	
雙層	1.5 - 1.0
舊結構：	
玻璃：	
狀況良好	1.0 - 2.0
狀況惡劣	2.0 - 4.0

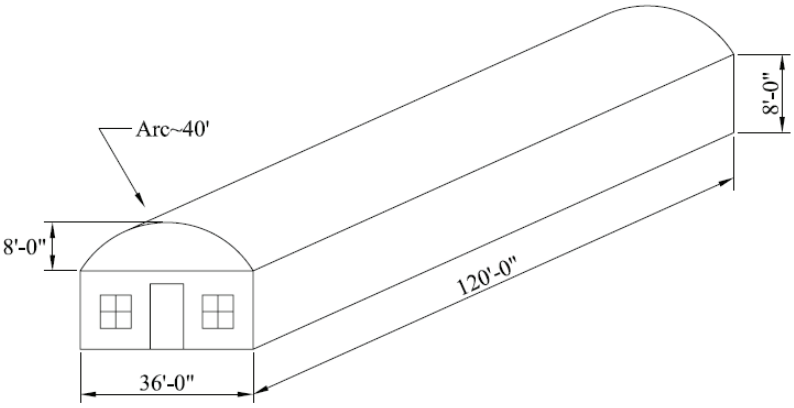
為便於估計，表3給予美國佛羅里達州鄉鎮與其相關冬天設計溫度之列示，就每一場所而言，都有99%與97.5%兩種設計溫度。99%欄位意謂在12月、1月與2月份，所紀錄每小時溫度之99%超過所列設計值。就本計算例而言，假設溫室係建造在Tallahassee附近以種植水耕番茄，其係單棟結構並鑲嵌透明雙層聚乙烯膠膜，溫室尺寸為長120 ft、寬36 ft、拱形屋頂最高點高16 ft，以及邊牆高8 ft，圖1顯示該溫室之尺寸示意圖。就番茄而言，為避免作物損傷，據建議溫室溫度不可下降低於50°F，然而，為有最佳著果與水果品質，也有建議溫度不可低於62°F。

表三、所選擇佛羅里達鄉鎮之設計溫度(Jones, 2008a)
Table 3. Design temperatures for selected Florida towns

城鎮	冬天(Winter), ℉		夏天(Summer), ℉	
	99%	97.50%	1%	2.50%
Bell Glade	41	44	92	91
Daytona Beach	32	35	92	90
Ft. Lauderdale	42	46	92	91
Ft. Myers	41	44	93	92
Ft. Pierce	38	42	91	90
Gainesville	28	31	95	93
Jacksonville	29	32	96	94
Lakeland	39	41	93	91
Ocala	31	34	95	93
Orlando	35	38	94	93
Panama City	29	33	92	90
Pensacola	25	29	94	93
Sanford	35	38	94	93
Tallahassee	27	30	94	92
Tampa	36	40	94	92
West Palm Bch	41	45	92	91

計算大概之傳導熱損失(Qc)：計算溫室表面積(A)，從表一選取適當之總熱傳遞係數(U)，以及從表3選擇冬天設計溫度(To)。為計算總溫室表面積，須加總

下述項：邊牆(As= 2 xl20 ft x 8 ft = 1920 ft^2)、端牆(Ae = 2 x 36 ft x12 ft = 864 ft^2)與屋頂(Ar = 120 ft x 40 ft =4800 ft^2)。本例中，假設最小可接受空氣溫度(Ti)為50°F。獲得相關數值如下：



圖一、單棟雙層聚乙烯膠膜溫室(典型蔬菜生產系統)之尺寸示意圖(Jones, 2008a)
Fig. 1. A schematic of a single-bay, double-poly greenhouse typical of vegetable production systems.

$A = As + Ae + Ar = 7584\ ft^2$

$U = .7\ Btu/(ft^2\ °F\ \ hr)$

$Ti = 50°F$

$To = 27°F$

$Qc = .7\ Btu/(ft^2\ °F\ \ hr)\ \ x\ 11{,}300\ ft^2\ \ x\ (50 - 27)\ °F = 122{,}102\ Btu/hr$

計算大概之滲透熱損失(Qi)：計算溫室體積(V)與從表2選擇適當空氣交換值(C)。像使用於前述傳導熱損失計算使用相同之溫度值。獲得相關數值如下：

$V = 51{,}100\ ft^3$

C = l air exchange per hr

Qi = .02 Btu/ft^3 oF x 51,100 ft^3 x 1 air exchange per hr x (50 -27) °F= 23,506 Btu/hr

總熱損失率(Qt)係傳導熱損失與滲透熱損失之加總：

$Qt = Qc + Qi = 145{,}608\ Btu/hr$

就本例中之溫室，加熱系統必須能夠提供160,000 Btu/hr(含10%安全邊際值)之熱量，以補償在佛羅里達州Tallahassee冬天最冷日子時所可預期之能量損失。

三、加熱系統

一但加熱需求被計算出來，就可據以選擇所需容量之加熱系統，這可由使用之設備、使用之燃油種類與後續管理實務等觀點進行考量完成選擇，加熱系統必須與溫室結構種類與所種作物協調一致。

（一）單元空間加熱器(Unit Space Heaters)

單元空間加熱器通常以天然氣或燃料油當燃料，並使用風扇作熱分散作業，它們通常從溫室上方結構懸吊下來，但也有承裝在地板上的，這種系統相對地容易安裝且需要相對中等之資本投資，儘管燃燒丙烷或天然氣之空間加熱器會產生有利作物之二氧化碳，但它們也製造對人體與植物有害之燃燒副產品(例如一氧化碳與乙烯)。為避免此潛在問題單元空間加熱器必須排氣，排氣管必須遵從廠商之建議具有足夠之大小，而且至少超出溫室最高點120 cm以上。最後，在緊鄰之溫室中每一空間加熱器之新鮮空氣入口必需具有與單元燃燒器符合之大小(通常15至20cm)。

（二）熱水系統(Hot Water Systems)

熱水系統利用加熱管以進行周邊或列加熱，其倚賴自然對流以分散加溫空氣，熱水也可使用於高架風扇強制加熱系統。熱水系統包括鍋爐、閥與壓力/溫度調節控制系統。蒸汽加熱系統比熱水系統較複雜安裝，而且需要較多維護，儘管加熱或冷卻熱水系統之管路比起蒸汽加熱系統者慢，但溫度通常較均勻。

（三）蒸汽加熱系統(Steam Heating Systems)

蒸汽加熱系統包括鍋爐、閥、U形彎管(traps)與控制系統，其複雜度因使用鍋爐型式與大小而改變。蒸汽加熱系統提供蒸汽管線之快速加熱與冷卻，而且比熱水系統需要更少管線，管線可以是平滑或加鰭片，而且如果有需要也可與風扇一起使用以提高較均勻之分布，蒸汽在土壤栽培系統也可用於土壤之殺菌消毒。通常使用蒸汽加熱系統大約1/3的管線係高架，而其他2/3則沿著周圍或邊牆。蒸汽加熱系統需要較高之初始投資，但有較長之預期壽命。

（四）聚乙烯膠管系統(Poly-tube Systems)

聚乙烯膠管系統(如圖二)常常被使用以連結上述任一加熱單元，以提供更均勻之熱分布、空氣移動與通風。當聚乙烯膠管系統使用在加熱系統，它們被與加熱組件一起安裝，此加熱組件通常係聚乙烯膠管系統充氣用風扇之擋板入口(baffled inlet)，在此擋板兩側固定距離處有水平釋放式加熱單元。當控制(自動調溫器thermostat)要求加熱時，單元加熱器打開並吹送經加熱空氣進入擋板之開啟側，一但空氣溫度被增加至設定點時，加

熱器即停止，但聚乙烯膠管系統之風扇繼續循環空氣，此種系統也用於除濕及以外氣進行通風。

在大部分大的(單一或連棟)溫室，最好經由縱走溫室長度之聚乙烯對流管提供熱氣，此管係以柱流風扇(jet fan)充氣，亦即此柱流風扇由加熱器接收經加熱之空氣並吹送熱氣經由對流管進入溫室。此熱散佈管之擺置必須小心思量，傳統上此 30 吋(76 cm)大管縱走整個溫室長度，由柱流風扇至溫室之相反端，此管通常位於地面上大約8呎(244 cm)高，因此熱係在植物葉叢上方釋放，而較多熱係用以增加溫室較高

圖二、利用排氣孔管系統進行空氣循環
Fig. 2. Air circulation conducted by using poly-fan-tube systems

處之空氣溫度。較佳之方式係釋放熱空氣進入作物下方、放置在或接近地板處較小之8吋(20 cm)聚乙烯膠管系統，熱氣因此上升進入作物葉叢，此種系統在美國佛羅里達州對減少番茄葉疾病及提升果實品質業經證明有效，在此系統中棚架(trellis)上方增加保溫網(thermal curtain)也可幫助減低能源成本。

加熱可以來自燃燒液體丙烷、天然氣與蒸汽等，在單一獨立之溫室中，使用兩組較小加熱器是良好構想，在柱流風扇兩邊各使用一個小加熱器以取代一個較大加熱器，萬一某加熱器失效時，較不會凍壞植物。就雙加熱器系統而言，一個加熱器被控制當番茄葉叢溫度降至18℃時啟動，而另一加熱器則設定在16℃或17℃，假如加熱器大小正確，溫室溫度必不會落到低於16℃。

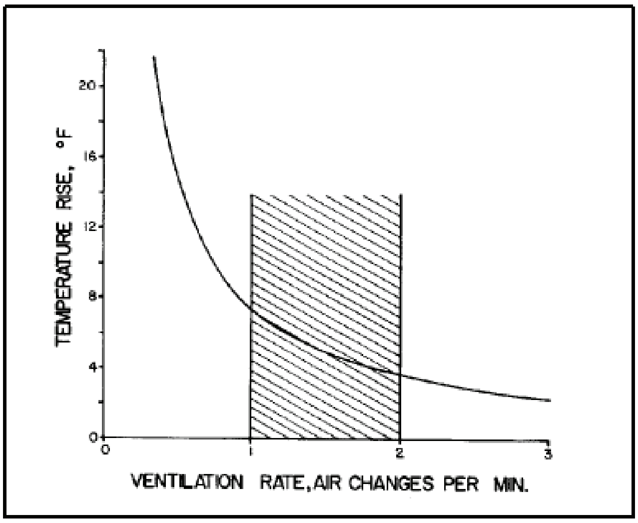
四、通風

以實務觀點而言，冷卻溫室之唯一經濟方法牽涉交換溫室內外空氣之通風，通風可以是由風與／或溫度梯度(熱氣上升)自然驅動或利用風扇機械式產生，在

熱帶地區自然空氣交換至溫室外面可以利用溫室結構之側邊簡單完成，而主動或機械式通風，通常使用低壓螺旋葉片風扇以進行溫室通風。就通風而言儘管有許多理由，其最明顯的目的在於控制高溫，適當尺寸之通風系統可避免溫室內空氣溫度比外界空氣溫度上升太高，而高溫度的原因在於經由溫室嵌板材料之太陽輻射進入量，通風系統必須有效地移動空氣使直接經由作物並跨越地板上方，並避免在植物附近有過度熱積累。通常可接受之基本原則如下，對較大溫室(30-36公尺長)而言，一個通風系統至少必須提供每分鐘一次空氣交換(一般以調整通風扇尺寸而作調節)，而對較小嗜好栽培用溫室而言，因其具有較大溫室表面積與地板面積比值，可能需要每分鐘2.5次之空氣交換。

圖三顯示夏天晴朗日子下跨越如圖1所示120呎(36.6 m)長雙層聚乙烯膠布溫室通風率與溫度上升之關係，當空氣交換率增加，溫度上升減少而內外空氣溫度差異減少，其易於歸結到愈多通風愈好，但提供增加通風容量之缺點有風扇與附件之成本上升與操作花費之增加，同時也必須注意不管通風率多高溫室內部空氣溫度總是比外界空氣溫度高，要獲致比外界還低之溫室溫度則需使用蒸發冷卻或其他調節空氣之輔助方法。

在佛羅里達州通風如果要被有效地使用在中等高溫時，必須配合使用風扇，大部分情況自然通風不足以倚賴，欲選擇正確風扇尺寸與數量，必須計算欲被移動之空氣總體積流率。欲被移動之空氣體積流率係由每分鐘(或小時)之空氣交換次數加以計算，一次空氣量交換等於其溫室體積，例如如圖1所示之結構有大約51,100 ft^3之體積，因此每分鐘一次交換對應51,100 cfm (ft^3/min)，特定溫室之體積係以端牆截面積乘以溫室長度加以計算。



圖三、通風率與溫室溫度上升之比較(Jones, 2008a)
Fig. 3. A comparison of ventilation rates and greenhouse temperature rise.

風扇之選擇，在美國建議使用符合AMCA (Air Moving and Conditioning Association)標準之機型，其額定值指明風扇在0.125吋水柱靜壓下之體積流率容量，風扇係在這些標準狀況下測試，因此所有風扇皆以相同基準定其額定值，這允許買家可以在不必調整不同測試狀況下比較性能資料。風扇係一種空氣幫浦，亦即製造壓力差異以促使空氣流動之機械。常見之兩種風扇分別為軸流風扇與離心流風扇，其差異在於氣流方向，軸流(螺旋槳式)風扇通常係通風應用與其他低靜壓狀況最常使用之型式。

選擇通風風扇時，下述資料是必須的：

（一）如前所述，每單位時間欲移動之空氣體積必須加以計算。

（二）必須估測靜壓(代表系統對氣流之阻力)，大部分情況溫室靜壓阻力介於0.07至0.1吋，對具有蒸發冷卻水牆之溫室，其溫室靜壓必須加上水牆之靜壓(估測值可從水牆製造商處獲得)。

（三）顧及效率，必須選擇在所估測靜壓下以最低馬力需求可傳遞所需體積流率(cfm)之風扇。

（四）必須考量經濟因素，如果最佳效率風扇所費遠超過最近可得之對手產品，那麼固定投資成本與變動操作成本間之取捨必須加以評估。

在為風扇定尺寸與安裝上，某些其他重要思量如下：

（一）假如風扇必須面對夏季盛行風，那麼就需增加風扇體積流率之10%容量，其也因此增加風扇馬達之對應馬力。

（二）顧及氣候防護與避免風扇不作動時之背流(backdrafts)，所有風扇必須安裝自動活動遮板。

（三）當兩毗鄰溫室之風扇過於彼此接近且排氣進入溫室間相同區域，它們必須被彼此偏移(offset)以避免彼此間之直接對吹。

（四）風扇必須適當加網與護蓋，以保護並避免人員與任何移動件(風扇葉片、皮帶輪與皮帶)接觸。

（五）安置排風扇其間隔不可多於30 呎(9 m)。

五、蒸發冷卻

只以單獨之通風，溫室溫度可能只被降低至接近外界位準，但若加上蒸發冷卻系統溫室空氣往往可被保持低於外界溫度。蒸發冷卻之工作原理乃因某一給予溫度之空氣可以保有某特定量之水蒸汽，相對濕度係空氣中真正存在之水蒸汽與

空氣所可保有總水蒸汽之百分率，當空氣保有其可保有之所有水蒸汽，其在飽和狀態而其相對濕度為100%，如果相對濕度低於100%之空氣遇上水，那麼某些水將被蒸發進入空氣中，從水至水蒸汽之相變化需要能量(亦即蒸發潛熱)，此能量係由空氣提供而且造成空氣本身之溫度下降。蒸發冷卻系統係由移動空氣經過溫室之風扇與某些加速水變成水蒸汽之組件組成，通常商業使用的有水牆與高壓噴霧兩種系統。

（一）水牆系統(Wetted Pad Systems)

水牆系統係在排氣風扇對面由2至6吋(6至15 cm)厚多孔性材料沿著溫室牆壁裝設而成，進入溫室之空氣被水平抽送經過多孔性水牆材料，上水槽平均分配水至水牆頂端。當水往下移動經過多孔性水牆時，水會理想地擴展覆蓋所有水牆表面，當外界空氣被抽送經過多孔性材料時，空氣會與水牆相當濕的表面緊密接觸，也因此大大地加速蒸發。如果空氣與潮溼表面間“理想接觸”是可能的，那麼系統將是100%有效，而且離開水牆之空氣將是飽合的，實際上最有效率之系統提供大約85%之冷卻潛勢。

冷卻之確切量主要取決於外界空氣之溫度與相對濕度，此關係並不完全確定，因為當溫度上升空氣之水蒸氣涵有能力也跟著上升。表4顯示溫度、相對濕度與冷卻潛勢之某些比較，表中數值顯示就冷卻而言，相對濕度愈高，冷卻潛勢愈低，而就某一相對濕度而言，溫度愈高，潛勢愈大。此表亦提供就某種效率水牆冷卻系統可被預期之冷卻數值，例如，在95°F與70%相對濕度，潛在的溫度下降是8.9°F(至86.1°F)，就85%效率之蒸發冷卻系統而言，實際溫降是7.6°F，因此空氣離開水牆而進入溫室之溫度大約應在87.4°F。

表四、不同溫度與濕度之冷卻潛勢(Jones, 2008a)
Table 4. Cooling potential for different temperatures and humidities

溫度 °F	相對濕度 %	溫度下降(Temperature Drop) °F 100%		85%	
95	90	28	(92.2)	2.4	(92.6)
	70	8.9	(86.1)	7.6	(87.4)
	50	15.9	(79.1)	13.5	(81.5)
90	90	2.6	(87.4)	2.2	(87.8)
	70	8.4	(81.6)	7.1	(82.9)
	50	15.0	(75.0)	12.7	(77.2)

溫度 °F	相對濕度 %	溫度下降(Temperature Drop) °F			
		100%		85%	
85	90	2.5	(82.5)	2.1	(82.9)
	70	8.0	(77.0)	6.8	(83.2)
	50	14.1	(70.9)	12.0	(73.0)

有多種形式之水牆，從低價山楊木(aspen)屑片水牆至昂貴、高效率(85%)之纖維素(cellulose)水牆。使用如圖1所示之溫室，下述例子示範計算提供某特定水準之冷卻下水牆材料截面積之普通程序，由於水牆長度限制在36呎(11 m)，真正之設計問題在於決定欲安裝水牆之高度。為計算此高度，每一材料之性能特徵值是需要的，具體地說，每種水牆有關聯之設計速度，表5列示三種不同材料(4吋纖維素水牆、6吋纖維素水牆與山楊木屑片水牆)之數值，而所需水牆高度計算如下：

表五、三種蒸發冷卻水牆材料之性能特性(Jones, 2008a)
Table 5. Performance characteristics for three evaporative pad materials

	4″ 纖維素 4" Cellulose	6″ 纖維素 6" Cellulose	山楊木 Aspen
設計速率Design Velocity (ft/min)	250.000	380.000	165.000
靜壓Static Pressure (in H_2O) 水牆(Pad)	0.026	0.067	0.065
靜壓Static Pressure (in H_2O) 水牆與溫室 (Pad and Greenhouse)	0.126	0.137	0.135
效率Efficiency	68.5%	73.5%	77.0%
預估壽命(年) Life Expectancy (yrs)	5 - 10	5 – 10	.5 - 2
範例計算高度 (ft) Example Calculation Height (ft)	5.6	3.7	8.5
冷卻度數 (°F) Cooling Degrees (°F)	10.3	11.0	11.6

$$\text{水牆高度(ft)} = \frac{\text{空氣流率}(\text{ft}^3/\text{min})}{\text{水牆長度}(ft) \times \text{設計速度}(ft/\text{min})} \quad (3)$$

就此例子，假設空氣流率是每分鐘一次空氣交換，如圖一所示之溫室即為51,100 ft^3/min，倘給定水牆長度36呎與表列3種設計速度，則不同材料之高度範圍從山楊木屑片水牆之8.5呎至6吋纖維素水牆之3.7呎。冷卻度數可以潛勢冷卻度數乘上水牆效率加以計算，例如，給定外界空氣90°F進入此水牆與相對濕度50%，從表4查得潛勢冷卻是15°F，因此，使用表5之效率值，4吋纖維素水牆可以提供10.3°F之冷卻，6吋纖維素水牆可以提供11°F之冷卻，而山楊木屑片水牆可以提供11.6°F之冷卻。在這些材料中進行選擇時，就每一個別溫室而言，初始成本、所需牆之空間與預期壽命都必須納入商業計劃之因素。其他有關設計與安裝水牆之考量如下：

1. 可能的話，安裝水牆在夏季盛行風側，而風扇則在溫室的下風側。
2. 排風扇不可對著另一溫室之水牆排氣，除非它們離開至少50呎(15 m)。
3. 水牆至風扇之最大實用距離不可超出200呎(61 m)，而距離在150呎(45.7 m)以下係較有效率的。
4. 水牆必須安排在排氣扇反方向沿著整個牆壁的連續地段，例如門口之間隙可能造成上至8倍間隙寬度之"熱點"。
5. 當需要加熱以取代冷卻時，必須提供活動遮板以關閉水牆部份。
6. 建造並保持氣密之溫室，當水牆系統運作時不要讓門或排氣孔打開，因為空氣是沿著較容易之氣流路徑移動。
7. 在水牆上提供遮網以將昆蟲隔離在外。

（二）高壓噴霧系統(High Pressure Fog Systems)

噴霧系統係在高壓下操作以產生大比率微小水顆粒，其繼續懸浮在空氣中而不掉落，欲獲得此種霧粒需要特殊設計之噴嘴與介於500至1000 psi(35至70 kg/cm^2)之壓力。理想上，此種霧粒繼續懸浮在空氣中直到其蒸發，就因為這原因，噴霧系統有潛力提供非常有效之方法以蒸發方式冷卻溫室。成列之噴嘴可被分佈橫越溫室長度，並階段地操作以達成非常均勻之濕度分布，就像蒸發水牆一樣，高壓噴霧系統必須與通風扇連結操作。

高壓噴霧系統比蒸發水牆系統更加複雜，而且需要相當多的維護，其組件之可信賴性(reliability)經常因價格而變動。大多數失敗的原因為水質，各地方水質變異相當大，因此每一水源必須加以測試，並依據測試結果之建議進行處理。通常例外的情形非常少，大部分的水都必須加以處理，通常需要結合過濾與化學處理以保持噴霧系統之正常運作，而明智的

做法係在安裝之前適當評估水質與處理需求。

高壓噴霧系統算來仍是相當新的作業方式，然而倘能適當地設計、安裝與操作，其將是以蒸發方式冷卻溫室之最有效方法，但是其初始投資與維護需求卻是高而且不可或缺。

六、遮蔭系統

就某些種植季節而言，使用風扇與蒸發冷卻系統作溫室通風是可以接受的，然而，針對早秋種植季節與晚春收穫期間，為控制溫室內過度之熱積累必須有額外的方法，通常過度熱(高於85°F)可歸因於數種生長與果實成熟問題。在此期間，當溫室輻射負載超過蒸發冷卻系統所可處理時，植物必須遮蔭，基本上遮蔭有兩種方式，即遮蔭漆與遮陰網。白色之遮蔭化合物被施用在聚乙烯膠膜溫室覆蓋之外面，而遮蔭網可被應用在溫室上方或在溫室內之棚架(trellis)系統。

與台灣的情形一樣，佛羅里達的種植者顯然需要溫室上方與內部遮蔭系統兩者之結合，兩者單獨似乎都無法有效地控制熱積累。溫室內部在植物高度遮蔭網單獨使用之問題在於遮蔭網上方之過度熱會被排氣風扇抽引進入種植區域，而使用遮蔭漆或溫室上方單獨遮蔭網之問題，則在於當需要重遮蔭時單獨遮蔭下熱積累仍然是問題，而且有時光量可能掉到最佳水準以下，反而造成過度遮蔭。使用遮蔭漆之另一問題為其係"完全或無"之方式，而不像遮蔭網一樣在低與高陽光狀況下可"關(收網)與開(張網)"。

實際可提供所需遮蔭之系統係在纜線上之遮蔭網，其可依據光量(因天氣狀況與季節而異)簡易地配置或移去，通常依著溫室屋頂之輪廓配置遮蔭網，其可於晴天時拉起，而於陰天時收下，此種遮蔭覆蓋可排除於溫室外側塗遮蔭漆之需求，而考慮風對遮網之損害，內部遮蔭網則比外部遮蔭網為佳。

內部頂篷遮網(inside ceiling contour curtain)可輔助以植物上方遮網(above-plant curtain)或布，其安裝於棚架系統上剛好位於植物上方處，此植物上方遮網將降低其上方之熱積累，不但提供額外之遮蔭，也可幫助增加從水牆抽送冷空氣經過溫室之風扇效率，而內部頂篷遮網也可補以"閣樓"風扇("attic" fan)或噴霧系統以移除溫室頂篷區域之熱空氣。

在佛羅里達州於秋天與春天種植蔬菜是一種極度挑戰，需要相當有利之方法處理並移除熱積累，假如熱無法被有效控制，那麼種植者必須考慮在6至9月期間停止生產。

七、水平氣流風扇

當大通風扇沒有運作時，較小之水平空氣循環扇(如圖4所示)可以提高溫室

中較均勻之濕度、溫度與二氧化碳，以確保整個溫室中較一致之植物性能，空氣循環也可最小化植物自由水之形成，其可避免疾病生物體之發展及溫室內嵌板表面之水分凝結。

通常使用以提供溫室水平空氣循環者主要有兩種系統，亦即風扇管系統(fan tube system)與低速高流量風扇系統(low velocity, high volume fan system)。風扇管系統從溫室一端獲取空氣，而將其以多孔聚乙烯膠管向下分布經過作物，外界新鮮之通風空氣可被供應至風管以作溫室空氣溫度與濕度之小調整，此系統如前所述可被使用以結合加熱器供均勻散佈溫暖空氣，此系統之風管因使用會變得骯髒並減低光的傳送，因此風管一般上每年必須更換。

低速高流量風扇系統藉由建立溫室空氣循環樣式而散佈空氣，此系統由一或多個移動空氣使經過溫室長度之風扇組成，牽涉多棟(間隔)溫室時，風扇必須被擺置成交換方向，以促進空氣流能夠流串整個溫室，此種風扇投射非常少之蔭影，而且很少需要維護。

八、二氧化碳噴注

增加二氧化碳至溫室環境具有好處，就特定數種蔬菜作物而言，例如小黃瓜、萵苣與番茄，其對二氧化碳之添加有一致性良好之反應。二氧化碳是光合作用(碳同化carbon assimilation)所需，在其過程中綠色植物使用從陽光而來之能源轉變二氧化碳與水生成糖，此種糖隨後會被植物使用以供生長與維護。在支撐此過程上，糖於呼吸作用過程中被燃燒以釋放能量，某些已固定之二氧化碳因此被釋放回到空氣中，光合作用與呼吸作用量之差額即是植物中乾物累積之基礎，這對種植者而言相當重要，因為愈多乾物累積，生長愈多，產量愈高。

經由擴散過程，二氧化碳透過葉片上的小孔(氣孔)進入植物，二氧化碳被光合作用固定在葉中之比率取決於葉片內二氧化碳之濃度，其接著由空氣中二氧化碳之濃度決定，因此，增加葉片外圍附近空氣之二氧化碳濃度將增加二氧化碳攝入與生長之比率。

外界空氣一般含有大約340 ppm (按體積則為0.034%)之二氧化碳，植物在此二氧化碳濃度通常生長良好，但假如二氧化碳濃度高些，其將有製造更多糖之反應。封閉溫室中白天時植物使用二氧化碳，會造成二氧化碳濃度低於340 ppm而降低光合作用，在新造氣密雙層嵌板式溫室中，由於其具非常低之洩漏率，二氧化碳濃度之下降特別顯著而且對生產有非常負面之效果。儘管通風可將二氧化碳濃度帶回接近340 ppm，只有輔助性二氧化碳噴注可真正提高溫室內二氧化碳濃度，使達比外界空氣更高之二氧化碳濃度。對大部分作物而言，通常二氧化碳濃度之基本應用原則為二氧化碳濃度超過1300 ppm時其效用價值遞減，而較低之濃度(800 ppm)被推薦以種植種苗(番茄、小黃瓜與甜椒)與萵苣。

圖四、水平氣流風扇循環溫室內空氣並創造較均勻之環境狀況(Jones, 2008a)
Fig. 4. Horizontal air-flow fans circulate air inside the greenhouse creating more uniform environmental conditions.

燃燒氣體以獲得二氧化碳可以製造熱當副產品，其就北方溫室而言可能是利處，但在南方的佛羅里達州業經證明是一項問題。就溫暖氣候之二氧化碳噴注而言，液體壓縮之二氧化碳可在不產生無用熱下被使用，液態二氧化碳也有許多超越石化燃料系統之其他優點，其不僅相當純、不含硫並可避免不完全燃燒之問題，而且它的使用既不產生水蒸汽，也不會在燃燒器附近造成熱點。再者，液態二氧化碳噴注系統與燃燒器系統之維護相較較低。唯一的缺點是液態二氧化碳噴注系統之價格遠高於丙烷或天然氣燃燒器系統。

如果溫室中要維持高二氧化碳濃度，在計算維持所要濃度所需二氧化碳量時需要考慮兩個因子，即自然空氣交換(洩漏)與溫室中光合作用，因為它們會降低高二氧化碳濃度。洩漏會與外界空氣(340 ppm)交換經添加二氧化碳之溫室空氣，而以風扇通風此種交換損失自然變得非常大。光合作用率主要取決於作物與光量，通常原則為提供生長良好之作物在強光下，單位地板面積植物二氧化碳攝入率之最大合理估計值大約在0.5 lb/hr/1000 ft^2。

因為二氧化碳係經由葉片而被帶入植物體內，因此二氧化碳感測器在植物葉叢中之放置位置相當重要，通常最佳放置位置在從植物底部往上2/3高度處，而且二氧化碳應該被噴注在植物葉叢附近區域，而非植物上方之空間。重要的是不要放置二氧化碳感測器在二氧化碳釋放管線附近，通常每個溫室1個感測器已足以監測二氧化碳。

二氧化碳應該只在白天被添加，因為要利用它植物必須有光，而且當溫室關閉時二氧化碳噴注最有效，當通風扇正快速將空氣帶出溫室時，試著維持高二氧化碳濃度是不切實際而且沒有意義。冷而且晴朗的日子會是使用二氧化碳噴注之理想時間，以佛羅里達州為例，冬天溫度過於溫暖以致蔬菜生產溫室白天經常需要通風，也因此二氧化碳噴注通常並不重要，所以，佛羅里達州的種植者，尤其在佛羅里達半島者，必須仔細思考是否二氧化碳噴注會是有利。

溫室環境控制(Jones, 2008b)

大體而言，溫室環境控制包括溫室結構、相關設備與特徵化溫室作物生產之每日管理決定。典型溫室控制乃手動調整、定時事件與定溫調整作動等之混合，複雜操作則使用電腦，而電腦化環境控制讓整合溫室不同組件成有效率且獲利之系統成為可能。

一、作物環境反應特徵

商業化作物之種植應可預期，例如就聖誕紅栽培而言，完全瞭解日長與開花之關係是調整聖誕節市場供應之基本資訊。種植者完全理解適度控制日長以獲得顧客所要明亮紅葉之重要性，也知道溫度與作物成長之關係，觀葉作物在夏天需要9週以長成市場所需之大小，在冬天則需12週。大部分種植者知道提高溫室溫度可以加速成長速率，而灌溉頻度、施肥率與二氧化碳濃度也都會影響作物成長與發展。

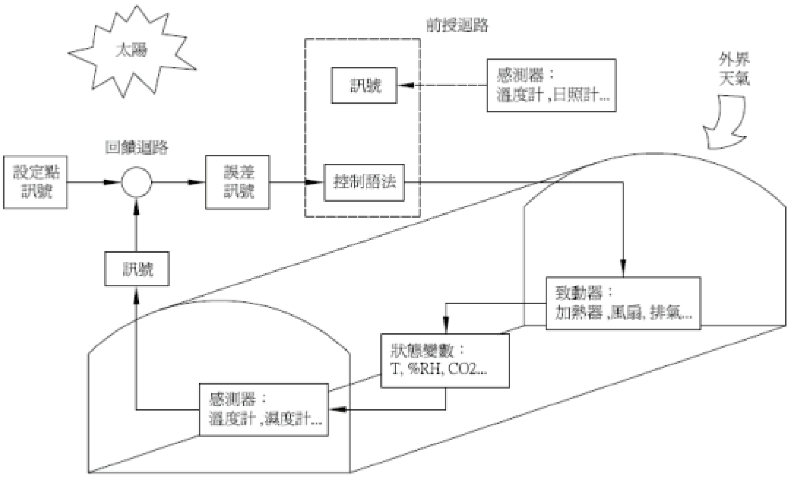
溫室操作之成功取決於一作又一作植物都對環境有一致性反應，在確認作物與其溫室環境之機制關係，種植者已愈來愈增加對自動控制系統之倚賴，因為其可提供一致且有利的環境狀況。例如，過去溫室作物之手動澆水是常見的工作，現在大部分種植者倚賴由定時器與電磁閥調節之自動灌溉系統，除了勞力節省之好處外，種植者已理解自動灌溉系統具有園藝上之優點，其讓調節灌溉事件之時序與種植者施用至其作物水量獲得精準度之提升。同樣方式，由自動調溫器至電子控制器之發展趨勢也已提供在調節加熱器、通風扇與水牆上靈活性之提升。而緊接的必然階段則是電腦溫室控制系統，其可連結並管理所有自動化控制子系統，一般而言，電腦控制策略比其他形式之控制器更加複雜，但其對加熱器、通風扇與其他控制設備更有效之操作卻提供種植者更準確之管理能力。另外，較不明顯的是電腦化控制系統可藉由提供溫室環境一致與詳實之資料，進而幫助種植者全管理策略之發展。

二、環境控制理論

圖五係溫室與其控制系統之示意圖，其中溫度、濕度與二氧化碳濃度係描述

溫室環境之主要**變數(variable)**，控制系統之目的乃在維持所關注變數使介於種植者所指定之極限中，為完成此一目的，控制系統必須對作用在溫室環境之**干擾**(例如陽光與外界氣候)有所回應，而所謂干擾就是發生在溫室內外且改變溫室內熱、水與二氧化碳平衡之過程。例如，太陽輻射或日光直接影響溫室之能量平衡與其結果溫度，而且太陽輻射因為其在光合作用之角色，也間接影響溫室之二氧化碳質量平衡(二氧化碳濃度)。

例如加熱器、風扇與通風之控制裝置或致動器也影響溫室系統熱與水之平衡，控制系統之目的乃在調節這些加熱器、風扇與其他控制裝置之輸入以抵消干擾，因而維持溫室系統在種植者所指定之環境狀況。控制系統經常使用回饋迴路(feedback loop)以調節致動器之操作，感測器監測每一可量測變數並產生該變數狀態之直接指標訊號，而控制器則從設定點訊號(所需設定)減掉所量測之訊號以製造一誤差訊號，其亦即所需之控制量，再由控制器使用這誤差訊號以驅動致動器。依據各特定裝置之不同，當量測值超過設定點時，控制器可能與誤差訊號成比率地改變設定或簡單地啟動或關閉某一設備。



圖五、電腦化環境控制系統示意圖(Jones, 2008b)
Fig. 5. A schematic representation of a computer-based environmental control system.

對所有控制系統而言，回饋設計是基本原則，甚至倚賴手動控制之種植者也遵從相同程序，當種植者檢查水銀玻璃溫度計(感測器)當溫室溫度(變數)之指標時，其心理上係比較所要(設定點)與現況(量測值)之差異(誤差)，依據誤差之方向(正負)與大小，種植者可調整致動器，比如當溫度變得太高時其可能啟動排風扇。相同地，雙金屬自動調溫器(bithermostat)以基本回饋原理運作，而複雜之電腦控制系統也是。

就某些控制問題，前授迴路(feedforward)可以改善控制決定，假如控制係基於回饋資訊，在控制器偵測到誤差並回應前，干擾之效果可能經由系統擴張而驅使變數遠離設定點，介於干擾產生與變數可量測改變形成之時間延遲，對緩慢過程而言其範圍可能從數分鐘變至數小時。前授迴路提供有關干擾(當其發生時)之資訊給控制器，假如控制器係以反映干擾之溫室系統進行程式設計，那麼它就能預期狀況之改變並在可量測改變真正發生前進行調整，種植者常常在手動控制中藉由確認趨勢並進行調整而使用前授控制技術，例如當天氣特別多雲時，謹慎的種植者預期到過度澆水之可能，於是調整其灌溉系統定時器。類似之前授方式，例如某些自動灌溉系統監測太陽光量，並以累積日光進行作物給水決定，由於電腦容易以描述溫室與作物及環境間交互作用之模式進行程式化設計，電腦控制器因此相當適合實行前授迴路控制。

三、感測器

所有溫室控制系統需要定義溫室環境之變數資訊，感測器提供此資訊。傳統上種植者就像一系統整合"感測器"般作動，其直接感覺其想要將作物生長與發展關聯之溫室狀況。為了輔助種植者對溫室環境之感覺，玻璃溫度計變成種植者通常使用以提供乾球溫度量化資訊之一種感測器，現在種植者有許多複雜之電子感測器可監測溫室狀況，並提供輸入資料供作自動進行愈來愈精微與有效之控制決定。許多溫室操作通常會連結至特定控制子系統，其可量測乾球溫度(熱敏電阻thermistors溫度計)、濕球溫度(空氣濕度計psychrometers)與光位準(日照計pyranometers)之電子感測器。其他感測器包括肥灌系統使用之電導度(EC)與pH探針、二氧化碳噴注系統使用之氣體分析器，以及使用以控制排氣位置之風速與風向感測器。在大部分的溫室中，感測器直接連結至例如風扇與水牆操作之特定控制操作，感測器常常只是控制子系統的一部份或可能以手動裝置進行區域或診斷性量測，因此，種植者並不紀錄感測器資料。

四、控制子系統

圖五電腦化環境控制系統中之其他基本組件乃致動器或自動控制子系統，一但電腦評估感測器資料並作一控制決定，必須有一電腦裝置以執行此決定。近年來商業溫室中通常使用之控制裝置，其數目與複雜性已穩定增加，在冷卻系統方面，水牆、高壓噴霧系統以及自動遮蔭網乃排氣裝置與通風扇外可用之創新。在歐洲經常使用之其他控制子系統也逐漸流行起來，其中肥料噴注系統相當普遍，有些種植者也已安裝起二氧化碳噴注設備，而水平氣流風扇或聚乙烯膠管系統也被用以於通風扇不作動時，混合溫室空氣以製造較均勻之環境。

所有這些子系統係與電腦控制相容，經由電腦連結這些組件子系統，一組感測器可以調節所有設備，更重要的是每一控制組件並非各自隔絕，而是與其他系

統中設備協調運作，例如，當通風扇作動時，就不會有二氧化碳噴注作業。

五、資料擷取

除了警報、較有效之設備控制與靈活性以外，電腦控制之最重要優點乃電腦可充當資料擷取系統之次要角色。擁有資料之優點可佛羅里達州Apopka農戶加熱系統之經驗明顯看出，該地農戶冷卻玫瑰作物以減緩玫瑰葉芽發展之策略間接地也說明資料擷取之好處，該案例中當種植者第一次試著操控玫瑰時，顯然並沒獲得準確之溫度，然而當季節改變，因應日均溫與累積光量之改變該策略可能需要調整，這時電腦中可靠資料之即時可得性提供玫瑰種植者所需要用以迅速確認其作物反應樣式之資料。在基本層次上，電腦控制系統之資料可訓練種植者有關他們溫室內真正之每日環境樣式，一但種植者熟悉系統所提供之資料，他們在電腦相關應用上會變得非常複雜並因而獲利。

六、來之控制系統

若干電腦控制系統趨勢值得思索，目前商業化發展之最夯產品乃分散式系統(distributed systems)，其乃指處理(計算)並非集中在一單獨電腦，替代地有許多獨立可程式控制器(子處理器)位於它們控制的溫室單元。每一子處理器具有與中央監測電腦(主處理器)之串列連接，子處理器操縱資料擷取與真正控制，而主處理器則儲存與顯示由子處理器傳送而來之資料，主處理器可下傳設定值與其他控制參數至任一連結之子處理器。

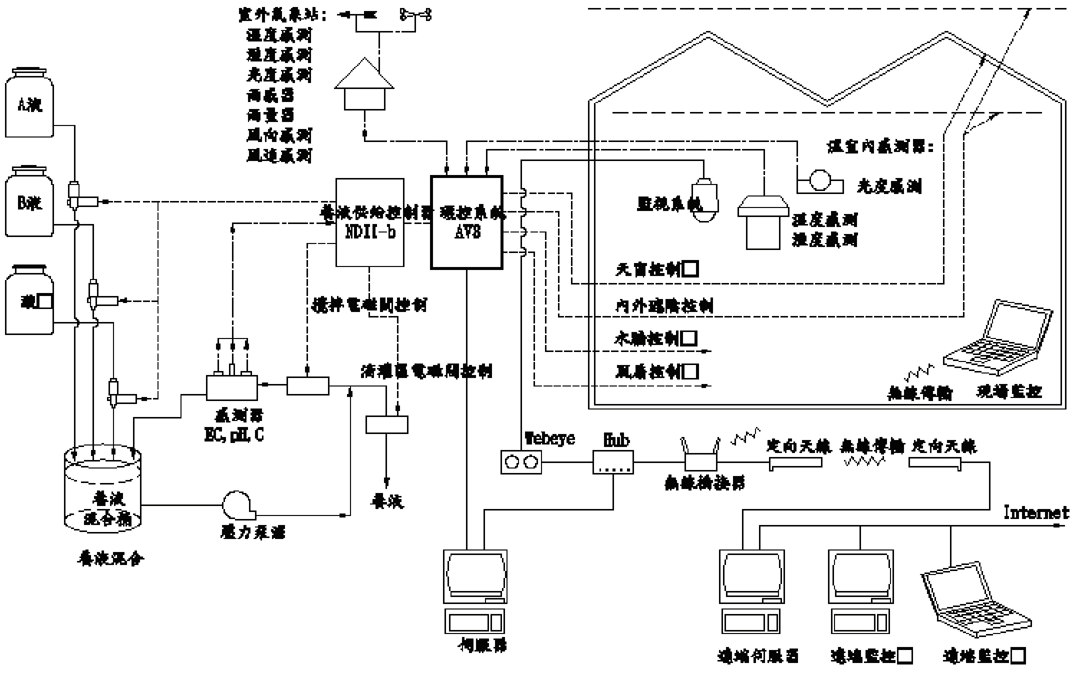
電腦愈來愈便宜與愈有效，性能增強之商用電腦結合中央資料擷取更提供溫室控制之新可能，其中自適控制(adaptive controls)概念乃經應用於工業控制問題之成功構想，本質上主電腦藉由檢查其所獲得資料進一步評估控制之品質，假如任一控制變數開始變動並比以往表現之預期更多，那麼系統將重新評估適當之控制常數、產生新數值，並將其下傳至子處理器。

這些系統之主要好處在於其可提供種植者相關於外面狀況之溫室狀況資料與控制子系統之操作特徵，這些資料給予種植者微調其生產系統所需之靈活性與資料，其底線在於得以利用由微調控制系統所維持一致、有效管理且自動控制之環境，持續生產高品質作物。

七、合無線區域網路與即時視訊之溫室數位環控肥灌系統(蔡等，2003)-國內環境控制實例

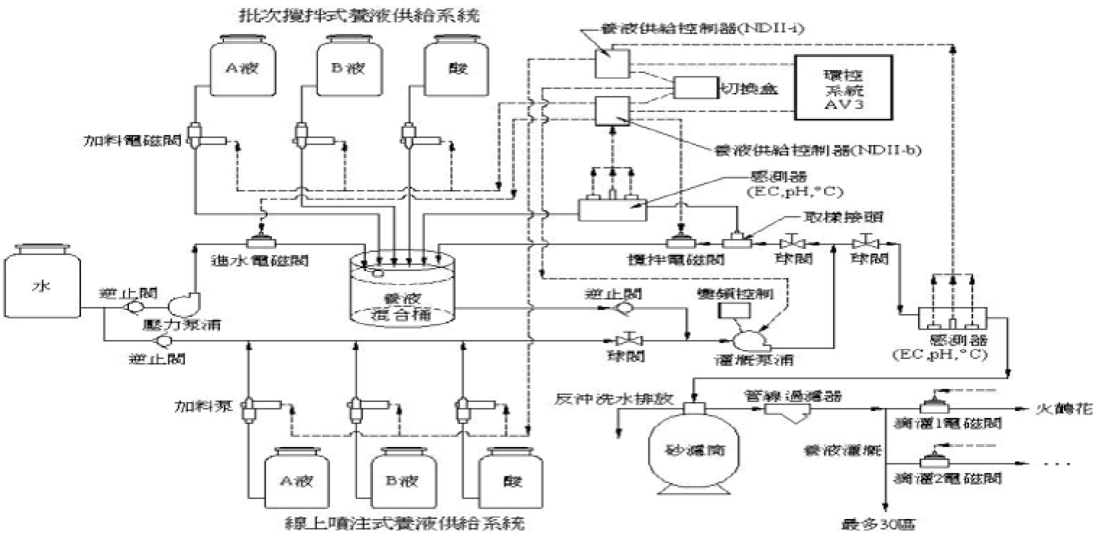
溫室結構與環控系統經國內專家學者多年來的努力研究，目前溫室內以風扇水牆降溫之應用最為普及，儘管已有使用環境電腦系統控制溫度、溼度及日照之成功案例，惟肥灌控制並未同步提升。因應未來農業朝精緻精準方向發展之趨勢，國內高經濟作物優勢生產勢需朝此方向提升，蔡等(2003)著眼於建立基本實

用之環境感知控制與自動化作業系統，並遂行遠端監控以及栽培期間完整資訊之收集與累積，曾建立整合無線區域網路與即時視訊之溫室數位環控肥灌系統一套，將肥灌離地栽培技術、環控整合策略、遠端監控技術、即時視訊應用與資訊管理等，整合應用在火鶴花溫室栽培試驗中，其除延展並擴大有線網路基本服務至溫室試驗區外，並結合即時視訊與遠端遙控技術，使溫室部份管理達到「操作者坐臥家中，溫室狀況與控制盡在彈指之間」之境界，可謂先進更具方便性之溫室管理模式。圖六與圖七分別顯示該系統與其養液供給控制系統之示意圖。圖八與圖九分別顯示其溫濕度與肥灌控制紀錄。而利用該系統針對不同介質對火鶴切花生產之影響試驗顯示，介質（泥炭：珍珠石）為（3：1）者表現較佳，無論產量與品質皆是，平均每株年產量達11枝，花梗長度59cm，花苞大小16.9*12.7cm，已經達到高水準栽培之要求。



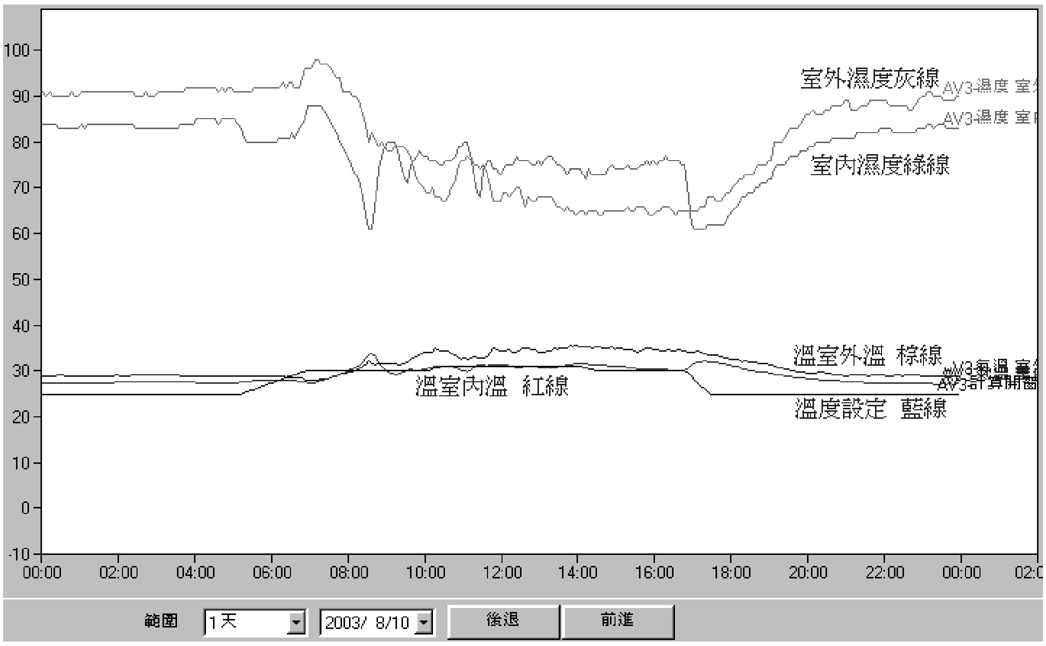
圖六、合無線區域網路與即時視訊溫室數位環控肥灌控制系統示意圖

Fig. 6 Sketch of the digital environment control and fertigation system integrated with wireless LAN and real time video images



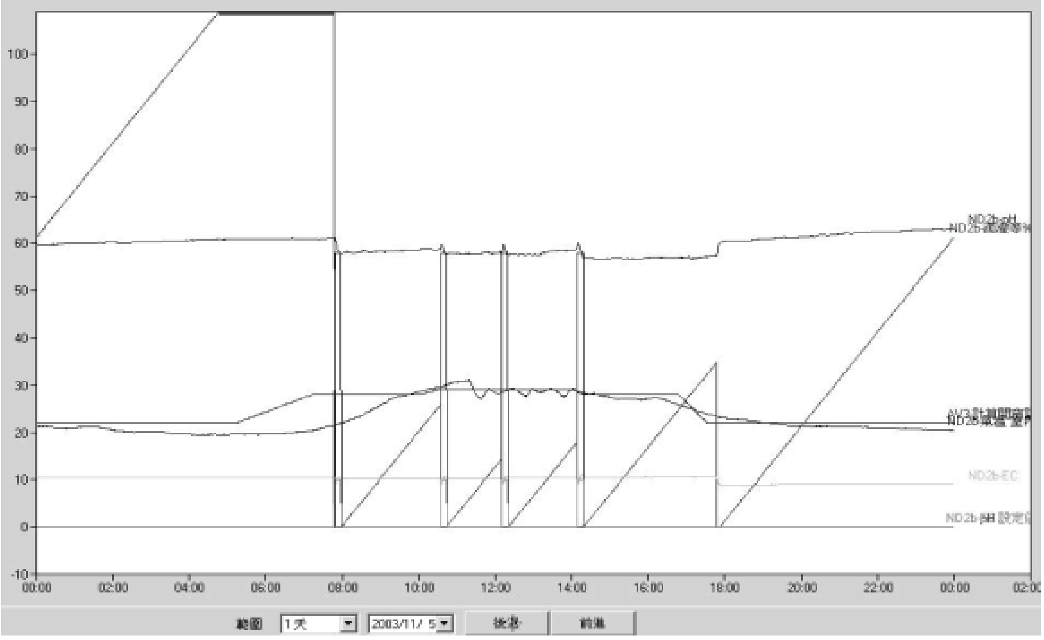
圖七、液供給控制系統示意圖

Fig. 7. etch of fertigation control system



圖八、季四時段溫室溫溼度控制結果

Fig.8. ntrol results of greenhouse temperature and humidity during four time stages in summer day



圖九、DIIb於92.11.5日之肥灌控制情形
Fig. 9. rtigation control case of NDIIb on Nov. 5, 2003

環境控制系統基於植物健康管理之考量

一、一般植物生理觀點(Hochmuth, 2008)

獲利性溫室生產取決於牽涉植物生長化學過程之複雜系統，靠著最佳溫室與栽培管理系統，種植者希望最大化植物生長效率，並因而有高品質產品之高產量

產生。光合作用(Photosynthesis)係植物利用輻射能源、二氧化碳與水以形成糖與氧的過程，此種基本過程發生在所謂葉綠粒(chloroplasts)之特殊葉細胞結構，而綠色色素之葉綠素(Chlorophyll)則吸收光能量而啟始此過程。光合作用係植物生長良好與高產量之關鍵，假如光合作用因低光、高濕度(氣孔關閉、氣體交換減少)或水緊迫狀況而減少，那麼糖的生成將減少，而果實品質、儲架壽命與大小也都將縮減。由於光合作用在植物生長中居緊要角色，通常光減少1%會轉化成產量1%之減少。通常光合作用受光強度、空氣中二氧化碳含量、空氣溫度、空氣濕度與水供應影響。

（一）光

由外界地形與樹木、溫室結構本身或溫室中較高植物而來的遮蔽可能顯著地減少到達作物之光量，溫室與溫室中植物行向應儘量以南北座向設

計，以便光可均勻分布至每棵作物，也些人使用白色地板覆蓋或漆以反射光回至作物。儘管有跡象顯示箔片有傾向困惑昆蟲而稍微降低蟲害，通常白漆比金屬或箔片更具反射性。

遮蔭對減少光量真正有效，因為其藉由減少到達植物輻射能源之量而降低植物葉叢溫度。在較長時期多雲天氣時，番茄葉片因含糖變低而可能顯得無光澤與變薄，此時過量的氮反而有害。有些種植者喜好幫番茄遮蔭，但也有人不這麼做，理論上遮蔭會減低光合作用，也因此減低總產量，然而在控制性研究中並非總是如此，事實上，某些使用30%遮網之研究總產量反而提升。夏天晴朗日子種植者對溫室遮蔭30至40%不會犧牲植物成長，因為減低後之陽光仍在光合作用所需之光飽和點以上。遮蔭可提升水果品質，因為水果上直接之日光可能造成黃或綠肩(shoulder)、破裂與鏽斑粗皮(russeting)現象，而老葉可替代性地被留著以遮蔽個別果串。在高夏季溫度與溼度區域，為保持溫度於合理範圍內遮蔭可能是必須的。然而，遮蔭與否之決定完全取決於溫室的位置、作物品種、季節以及種植者運用之整體管理系統。

光合作用率大略與溫室內光強度成正比，直至大約三分之一至二分之一全日光。就歷史事實而言，溫室產業傳統上以呎燭光(f.c., foot-candles)與流明(lumens)量測光，呎燭光係表面上接收到的光量，而流明則是光源放射光的量測。自然太陽光與人工光源落在作物上係以呎燭光量測，而由例如太陽與電燈等光源放射的光則以流明計量。在佛羅里達晴朗的夏天全日光可達10,000 f.c.，而冬天只有6,000 f.c. (有些地方則低至500 f.c.)，舒適閱讀須20 f.c.，而滿月的月光則低於1 f.c.。當沒有陽光時，從冷白光、高輸出螢光燈或高強度釋放鈉汽燈等輔助性人工光源對作物有益，但其非完整替代，輔助性人工光源的強度在作物表面應該達800至1,000 f.c.。除了種苗生產外，對蔬菜作物而言，輔助性人工光源通常不符經濟，然而就後院或嗜好栽培而言，在冬天月份全光譜光源藉由增加日長至18小時對提高產量是有效的。

現在植物學家主要關注在負責光合作用部份之光源，此光譜介於400至700 奈米，通常稱為光合作用有效輻射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)，在此PAR範圍的光通常以光合作用光子通量(Photosynthetic Photon Flux, PPF)進行量測，並以μmol/m^2/s表示。而以mol/m^{2}表示每日總PPF值已經證實與當日總光合作用相關。在美國西南區域，冬天的光量讀值比像紐約與俄亥俄州等北部區域高3倍，這也是為何美國溫室番茄產業在亞利桑那與周邊州快速成長的主要原因。

（二）二氧化碳

空氣中二氧化碳之濃度影響光合作用之速率，典型的戶外空氣二氧化碳濃度大約350 ppm，研究顯示只要光與溫度等在最佳狀況，藉由增加二氧化碳濃度至800或1,000 ppm可增加植物之生長與產量。二氧化碳可藉由從鋼瓶噴注二氧化碳氣体或於特殊燃燒器中燃燒天然氣或丙烷而被導入溫室，然而欲從添加二氧化碳獲得好處，其噴注必須於白天光亮期間完成，而且通風系統必須關閉。因此，二氧化碳噴注作業是否有益國內溫室栽培者仍值得探討。

（三）空氣溫度

溫度係影響生長過程之另一因子，當溫度從幾近凍結增加至大約37.8℃，酵素過程速度增加，試驗室試驗顯示溫度每增加10℃光合作用幾乎雙倍成長。白天與夜晚溫度都影響作物活力、葉片尺寸、葉片擴張率與果實成長時間。低夜溫情況下，葉片成長速度緩慢而且幼小作物之葉片尺寸減小。日夜溫度必須仔細監測，就大部分園藝作物而言，儘管許多新品種可以以較少日夜溫差而表現良好，通常的基本原則乃夜溫大約比日溫低5.5° C。例如番茄日溫必需介於21°至26° C而夜溫則在16°至18.5° C。就種苗而言，日夜溫度必須維持固定，大約在20°至22° C，隨後移植前調整作物使適應每天的溫度。超過30° C至35° C的高溫會對作物造成成長抑制甚至死亡等各種不同傷害，熱傷害的生理本質被認為牽涉植物細胞某些蛋白質成分的變性作用(denaturation)，這種高溫也會造成果實發育不全。低於最佳之溫度也會改變植物新陳代謝系統以減緩成長，並阻礙著果。

噴霧降溫系統可說是風扇水牆蒸發冷卻外之另類選擇，其倚賴無任何溶解鹽且完全乾淨之水以避免噴嘴堵塞，就像風扇水牆冷卻系統一樣，噴霧降溫系統只在低濕度環境真正有效。

嗜好栽培用溫室內溫度可以溫度計容易地量測高低溫，溫室內應放置多個溫度計，而且彼此校正，並與優質溫度計每年校正兩次。較大商業規模操作中，電腦控制系統相當普遍，此種系統可提供溫度、濕度、灌溉與肥灌、二氧化碳、光與遮蔭程度之完全整合控制。

（四）空氣濕度

為了讓作物活躍地成長，其必須被允許於光合作用期間自由地蒸散(transpire)，這意味著須有很多可用水、低至中等濕度，以及好的空氣循環。濕度藉由控制蒸發、離子抽運(ion pumping)，以及氣孔開閉，進而影響鈣的攝取與荷爾蒙的分布。高濕度結合低空氣運動會減少蒸發冷卻，並可能導致植物熱的過負載。

人們傾向以相對濕度思考濕度，其乃空氣中水蒸汽量與空氣在當下溫度所可持有之水蒸汽量比值，並以百分率表示。然而植物卻以水蒸汽壓差(vapor pressure deficit, VPD)感知濕度，VPD係空氣中水蒸汽壓力與葉片內水蒸汽壓力之差異。水藉由擴散從根部經過植物從葉片以蒸發水汽形式而排出，因而促成植物之往上抽運(pumped up)，其乃當水蒸汽從葉片內較高壓力處移動至周圍空氣之較低壓力處。低VPD(高相對濕度，大於90%)常是營養缺乏症狀的原因，例如花末端腐爛(blossom end rot)係缺乏鈣，因為植物無法蒸散，因此不能吸水或營養進入根部。而高VPD(低相對濕度，小於50%)也會導致相同症狀，因為水與營養被抽運過快經過植物，而將養份離子沉積在葉片中而不是恰當地沉積在果實中。

溫室濕度可以吊掛式空氣濕度計(psychrometer)量測，其他設備像濕度調節器(humidistat)可準確量測相對溼度至4%範圍內。大部份植物在相對溼度介於55至95%間可適當運作，其對應1.0 至 0.2 kPa的VPD值。對於番茄而言，理想的濕度夜間應該介於65 與 75%之間，而白天應該介於80與90%之間。低VPD(高相對濕度)下，葉片尺寸減小，花與果實發育不全顯著增加，因此番茄產量與果實品質較低。而番茄果實之玻璃質(Glassiness)與金色斑點(gold fleck)也可歸因於高空氣濕度。

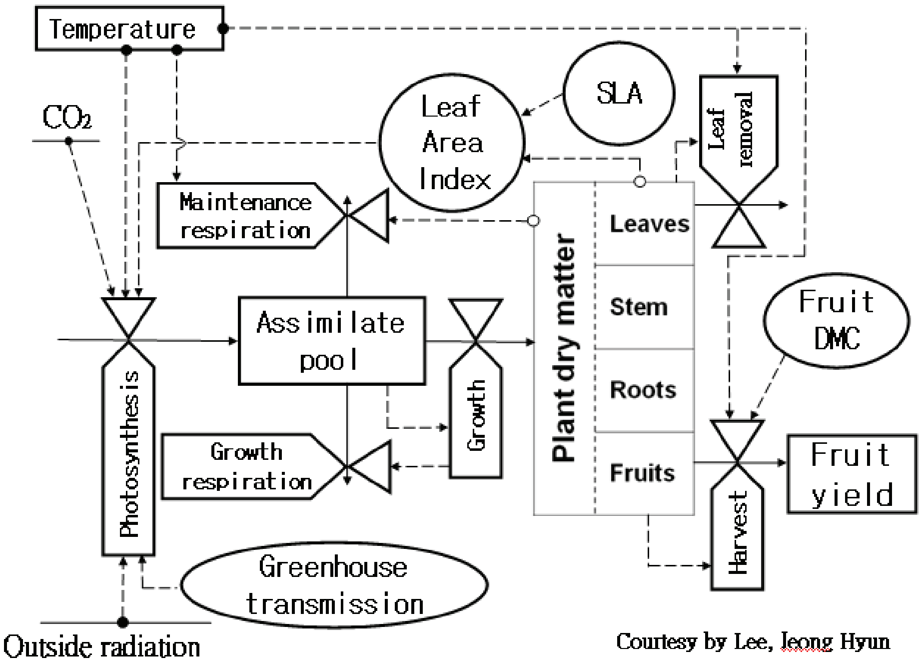
噴霧系統(misting and fogging systems)常被栽培者使用以增加濕度並降低溫度，然而倘不正當使用這些系統可能大量地增加黴菌(mildews)與植物病害的發生，更別提會腐蝕溫室之金屬結構。

（五）水供應

對植物之水供應也會影響光合作用速率，因為乾旱緊迫(drought stress)會造成葉片氣孔關閉，然而氣孔係光合作用所需二氧化碳進入植物之通道，因此凋萎之植物其生長速率將降至幾近於零。其他像營養缺乏、疾病與昆蟲也可能減低光合作用，營養缺乏會損害健康的葉片以及其製造葉綠素之能力，而有病之植體與昆蟲則減少進行光合作用健康葉面積之數量。

二、管理光合作用與呼吸作用並藉助環控技術進行作物控制

Kim (2009)與Lee(2009)指出溫室環境因子彼此互相影響，而其限制因子總因溫室狀況而不同，其強調必須注意植物生理並藉助環控技術以進行作物控制，其概念(如圖十所示)與一般只注重環境控制更勝一籌，值得效法並付之實際應用。



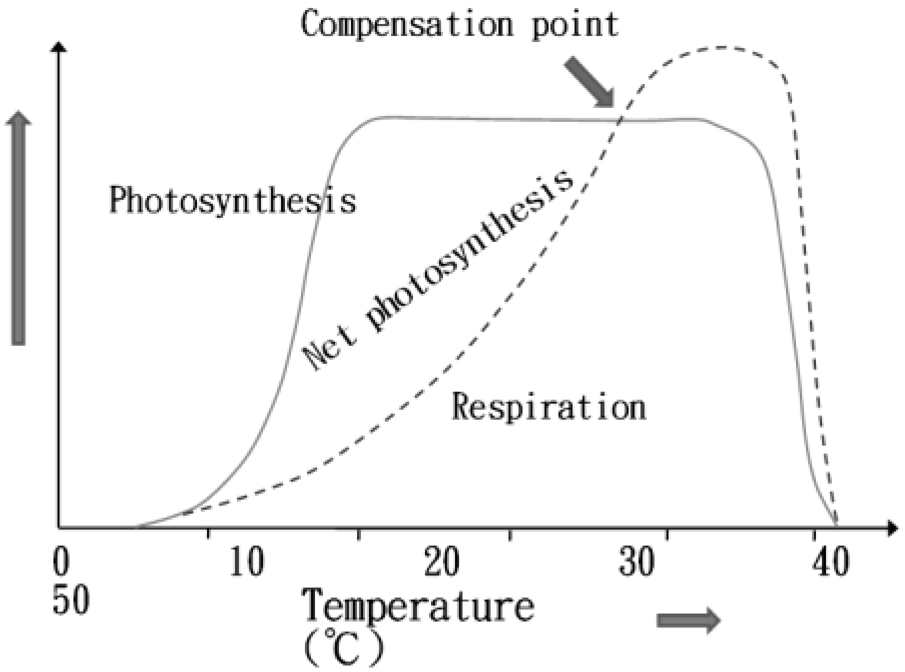
圖十、環境與作物之關係(Kim, 2009)
Fig. 10. Relation between environment and crop

溫室管理之主要目的在於維持植物光合作用之正常運作，幾乎所有溫室操作都與最佳化溫室環境以便提升植物生長速率有關。就植物生理而言，溫室內過程包括生長(growth)與蒸發散(transpiration)。生長可由乾物增加與作物進化兩方面來看。乾物增加牽涉光合作用與呼吸作用，以及同化轉換(transport of assimilate)效應，而作物進化牽涉細胞分裂(division)、細胞增長(elongation)、植物性(vegetative)或生殖性(generative)細胞變異(differentiation)，以及作物形狀等方面。光合作用將從太陽而來之能源固定，其產物在植物葉片中進行許多轉換以製造植物生長與果實生產所必須之成分，這些成分包括糖、胺基酸、蛋白質、澱粉、酵素、能量成分、纖維素、脂質(lipids)與核質酸(nucleic acids)等，其主要成分(碳水化合物(糖))會被轉換成乾物儲存在葉片、果實與球莖等地方。建構過程(光合作用)之產物可被使用於降解過程(呼吸作用)，亦即呼吸作用會消耗碳水化合物(釋放乾物之能量)，以供根、梗與葉之生長，以及傳輸水與養份，並在作物葉片中形成粒腺體(mitochondria) ，而粒腺體則會製造能量並將其應用於細胞反應中以同化成分進入細胞壁與細胞組成。光合作用僅在白天，而且僅在有綠葉(葉綠素)之地上部發生，呼吸作用日夜都進行並在作物各部分發生。

就像光合作用一樣，呼吸作用速率受許多因子影響，例如溫度、水分、植物損傷、植物組織之年齡、二氧化碳濃度與可用食物(光合物photosynthate)之數量

等。當溫度增加時，呼吸作用速率增加。呼吸作用於白天與晚上發生，種植者通常想要管理夜間溫度以便最小化過剩之呼吸作用。植物受傷會增加呼吸作用以便提供癒合傷口之物質，因此，種植者必須最小化相關作業(例如修剪、收穫與葉片之去除)之植物損傷。

光合作用與呼吸作用一起運作以形成植物之新陳代謝，其本質似乎相反，因為光合作用使用水與二氧化碳產生糖與氧，而呼吸作用則使用糖與氧以產生水與二氧化碳。溫室種植者之挑戰在於管理溫室環境並提供最佳栽培狀況，以導致新陳代謝之適當平衡進而促成高產量與高品質果實。倘能針對特定作物光合作用與呼吸作用之關係(如圖11)進行深入探究並建立最佳模式，則基於光合作用與呼吸作用管理之作物生產控制指日可待。一般而言，評估作物逆境狀態可能比評估作物總性能較容易成功，但是根基於生物資訊之控制系統將有益於最佳化先進控制系統之實踐。



圖十一、光合作用與呼吸作用之關係(Kim, 2009)
Fig. 11. Relationship between photosynthesis and respiration

結 論

栽培環境調控牽涉範圍廣泛，一般以溫室內生產較容易實際運作，大體而言，溫室環境控制包括溫室結構、相關設備與特徵化溫室作物生產之每日管理決

定。而植物健康管理所揭示「經由揣摩植物本身與週遭之生物、物理與化學條件等相關性，藉人為技術之修飾」之意涵，實是溫室環境最佳化管理長期以來追求與努力之目標。本文除整理改寫佛羅里達溫室蔬菜生產手冊中有關溫室環境考量、溫室環境控制與植物生理之基本內涵與觀念，提供讀者全盤理解，俾利未來植物健康管理實踐參考外，亦說明「整合無線區域網路與即時視訊之溫室數位環控肥灌系統」之國內環境控制實例。最後並強調「管理光合作用與呼吸作用並藉助環控技術進行作物控制」之理念與努力方向，冀望將植物健康管理概念融入現代化環境控制系統，以進一步形塑根基於生物資訊之最佳化先進控制技術。

引用文獻

林信山、柯南靖、郭聰欽。2005。植物健康管理在有機農業作物栽培之應用。有機農業經營管理研討會專刊：27~44。

蔡致榮、徐武煥、向為民、梁連勝、陸龍虎、張庚鵬、盛中德、謝廣文、黃益裕。2003。整合無線區域網路與即時視訊之溫室數位環控肥灌系統。2003資訊科技在農業之應用研討會論文專刊。第210 -215頁。

Hochmuth, G. J. 2008. General Aspects of Plant Growth - Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook. HS784, one of a series of the Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Jones, P.H. 2008a. Greenhouse Environmental Design Considerations - Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook. HS778, one of a series of the Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Jones, P.H. 2008b. Environmental Controls - Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook. HS779, one of a series of the Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Kim, Y. S. 2009. Environmental Factors in Greenhouse. Resource presentation at the Multicountry Observational Study Mission on Advanced Technologies for Greenhouse Farming held in Seoul, Republic of Korea.

Lee, J. H. 2009. Environmental control methods and system in greenhouse. Resource presentation at the Multicountry Observational Study Mission on Advanced Technologies for Greenhouse Farming held in Seoul, Republic of Korea.

Control of Cultivation Environment and Plant Health Management

Jyh-Rong Tsay[1]

Abstract

The scope involved with control of cultivation environment is quite broad, and it is more easily implemented in greenhouse production. Environmental control includes the greenhouse structure, related equipment, and the day-to-day management decisions that characterize greenhouse crop production. The definition of "Plant Health Management" partly depicted by"…through fathoming the relationship of biological, physical, and chemical conditions between the plant itself and its environment as well as modifying by means of artificial technology…" is really the long-term pursued and dedicated goal of optimization management of greenhouse environment. In addition to rewriting the fundamental contents and concepts pertaining to greenhouse environmental design considerations, environmental controls and plant physiology, which are discussed in Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook, this paper also explains a practical example of environment control in Taiwan. At last, a philosophy deserved to endeavoring in the future is posed to facilitate the "Crop Control" by managing photosynthesis and respiration with environmental controls. It is expected that, by combining the concept of plant health management into modern environmental control systems, an advanced optimization control technology based on biological information could be further set up.

Key words: Environment control, Plant health management, Crop control

[1] Agricultural Engineer & Director, Department of Agricultural Engineering, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC